

Aeropêndulo: Implementação de um Laboratório Virtual para Estudos de Modelagem e Controle de Sistemas Dinâmicos

Oséias Dias de Farias

Orientador: Prof. Dr. Raphael Barros Teixeira



Universidade Federal do Pará
Campus Universitário de Tucuruí
Faculdade de Engenharia Elétrica

Tucuruí - PA

Índices

- 1 Introdução
- 2 Desenvolvimento
- 3 Resultados e Discussões
- 4 Conclusão



Índice

1 Introdução

2 Desenvolvimento

3 Resultados e Discussões

4 Conclusão



Justificativa

- Os sistemas de controle desempenham um papel fundamental na sociedade contemporânea, permeando uma ampla gama de aplicações ao nosso redor.
- A abordagem convencional no ensino das disciplinas teóricas em cursos de Engenharia representa um desafio significativo, dada a dificuldade dos alunos em estabelecer conexões entre o conteúdo teórico e a aplicação prática nos sistemas físicos.
- Uma das principais razões pelas quais os estudantes encontram dificuldades é a transição do mundo físico para o mundo matemático abstrato.



Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um laboratório virtual abrangente para o estudo de sistemas de controle, contendo o protótipo de um Aeropêndulo e um conjunto de softwares.



Objetivo Específico

- Desenvolver o protótipo do Aeropêndulo;
- Desenvolver um simulador 3D (Gêmeo Digital);
- Interface de Usuário;
- Aplicar Identificação de sistema a Planta;
- Testar o sistema em Malha Fechada.



Escopo do Trabalho

- seção 2.2 Fundamentação teórica;
- seção 2.3 Implementa o protótipo de Aeropêndulo;
- seção 2.4 Desenvolvimento dos softwares;
- seção 2.5 Descreve as partes do laboratório;
- seção 3.2 Método de identificação de sistemas;
- seção 3.3 Implementa um controlador PID simples;
- seção 4.1 Considerações finais;
- seção 4.2 Trabalhos futuros.

Índice

1 Introdução

2 Desenvolvimento

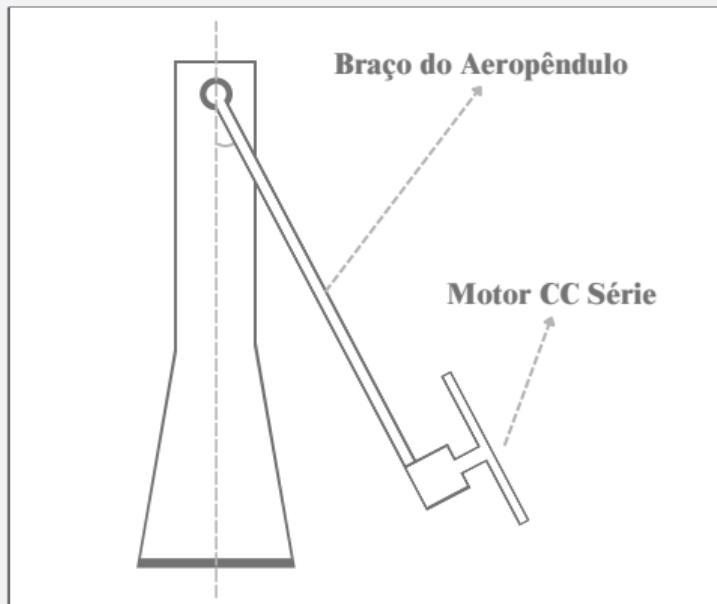
3 Resultados e Discussões

4 Conclusão



Aeropêndulo

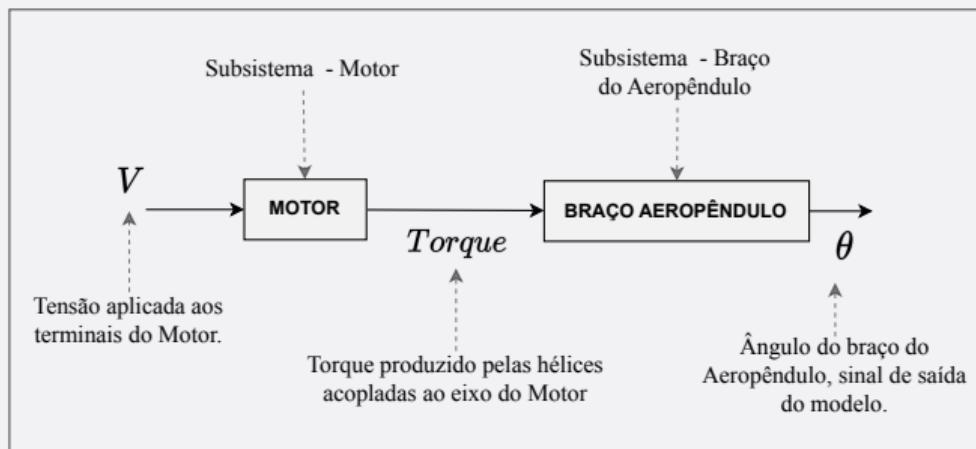
Figure: 1. Diagrama esquemático do Aeropêndulo.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Fundamentação Teórica

Figure: 2. Subsistemas do Aeropêndulo.



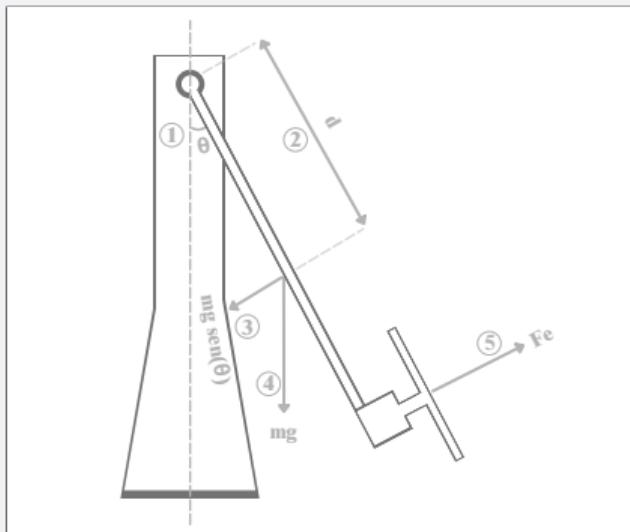
Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Fundamentação Teórica

Modelo Matemático Braço do Aeropêndulo

Figure: 3. Diagrama esquemático do Braço do Aeropêndulo.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Fundamentação Teórica

Modelo Matemático Braço do Aeropêndulo

$$F_e = J_b \ddot{\theta} + c \dot{\theta} + mgd \sin \theta \quad (2.1)$$

Onde:

- F_e : Empuxo gerado pela hélice
- J_b : Momento de inércia do Braço
- θ : posição angular do Aeropêndulo
- c : coeficiente de amortecimento viscoso
- m : massa do Aeropêndulo
- d : a distância entre o centro de massa e o ponto de pivô

Fundamentação Teórica

Modelo Matemático Braço do Aeropêndulo

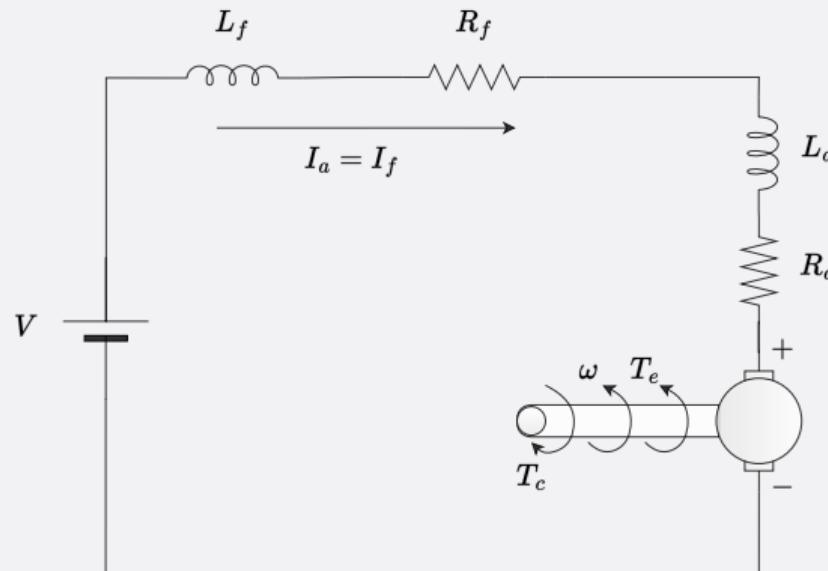
$$H(s) = \frac{\theta(s)}{\dot{\omega}(s)} = \frac{\frac{K_m}{J_b}}{s^2 + \frac{c}{J_b}s + \frac{mgd}{J_b}} \quad (2.8)$$



Fundamentação Teórica

Modelo Matemático do Motor CC Série

Figure: 5. Diagrama Elétrico/Mecânico Motor CC Série.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Fundamentação Teórica

Equações Diferenciais do Motor CC Série

Parte Mecânica

$$J_m \ddot{\omega}(t) = T_e(t) - b\dot{\omega}(t) - T_c(t) \quad (2.9)$$

Parte Elétrica

$$V(t) = (R_a + R_f)i(t) + (L_a + L_f)\frac{d}{dt}i(t) + E_a \quad (2.17)$$



Fundamentação Teórica

Função de Transferência do Motor CC Série

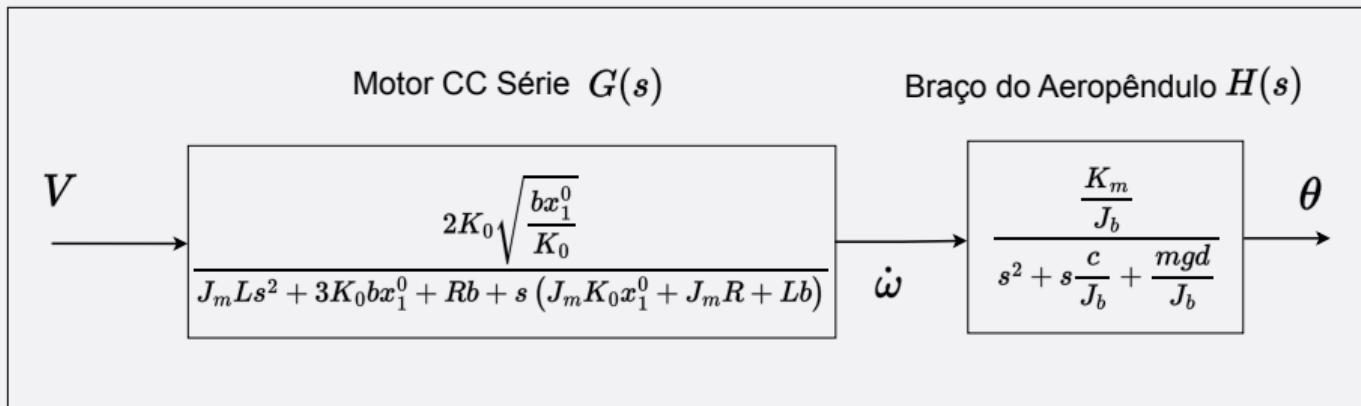
$$G(s) = \frac{\dot{\omega}(s)}{V(s)} = \frac{2K_0\sqrt{\frac{bx_1^0}{K_0}}}{J_m L s^2 + (J_m K_0 x_1^0 + J_m R + Lb)s + 3K_0 b x_1^0 + Rb} \quad (2.47)$$



Fundamentação Teórica

Junção dos subsistemas

Figure: 6. Diagrama da junção dos subsistemas do Aeropêndulo.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

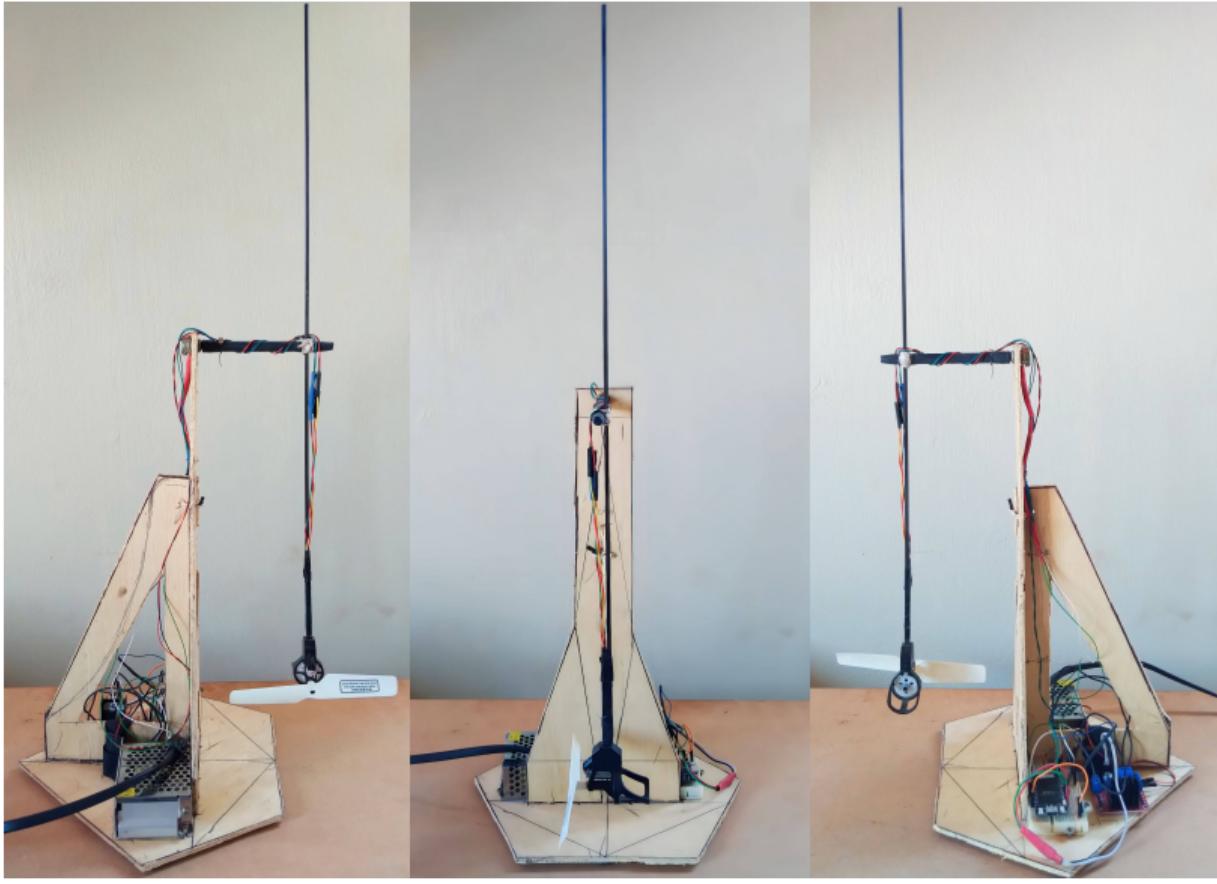


Implementação do Protótipo

Figure: 7. Protótipo do Aeropêndulo.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Implementação do Protótipo

Parte estrutural do sistema

Figure: 8. Chapas de compensado.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figure: 9. Chapas de compensado.



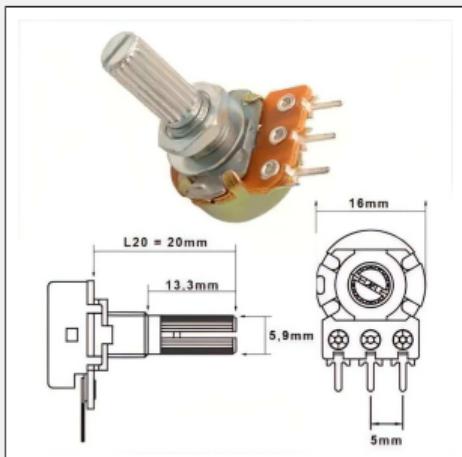
Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Implementação do Protótipo

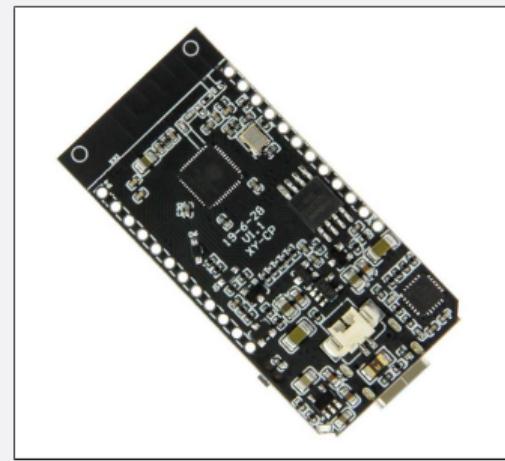
Parte Elétrica do sistema

Figure: 10. Potenciômetro $50k\Omega$.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figure: 11. Placa de desenvolvimento Esp32.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Implementação do Protótipo

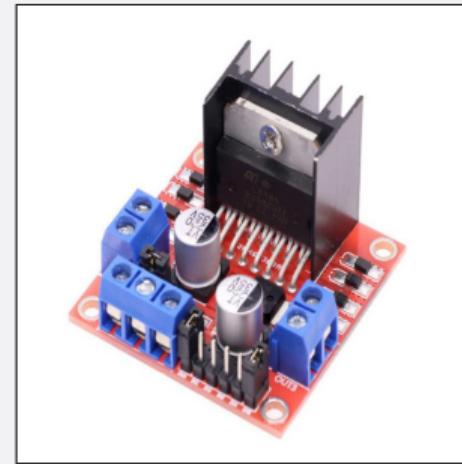
Parte Elétrica do sistema

Figure: 12. Fonte Chaveada 2A, 5V, 25W.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figure: 13. Módulo Driver L298n.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Implementação do Protótipo

Parte Elétrica do sistema

Figure: 14. Conjunto (suporte motor cw/ccw hélice).



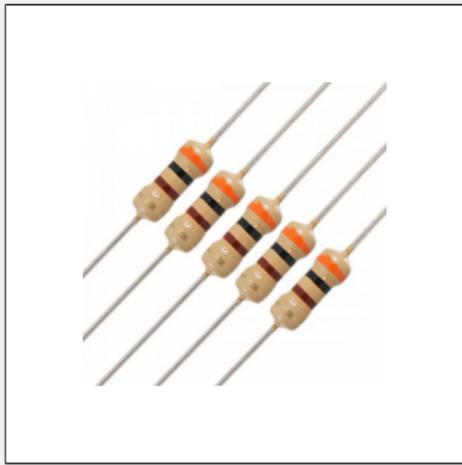
Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Implementação do Protótipo

Parte Elétrica do sistema

Figure: 15a. Resistores.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figure: 15b. Capacitores.



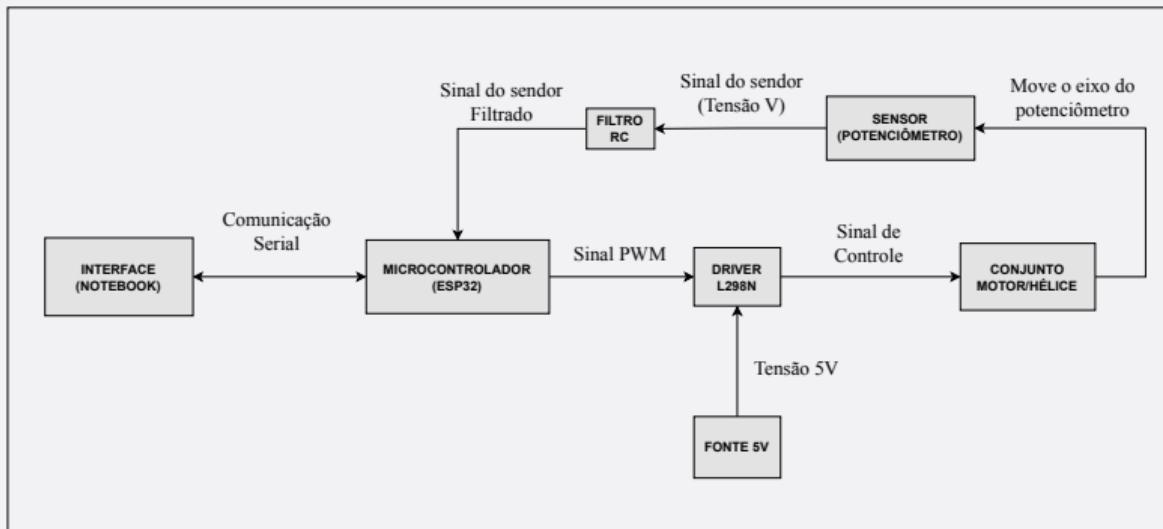
Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Implementação do Protótipo

Montagem do Protótipo - Parte Elétrica

Figure: 16. Diagrama de comunicação do Aeropêndulo.



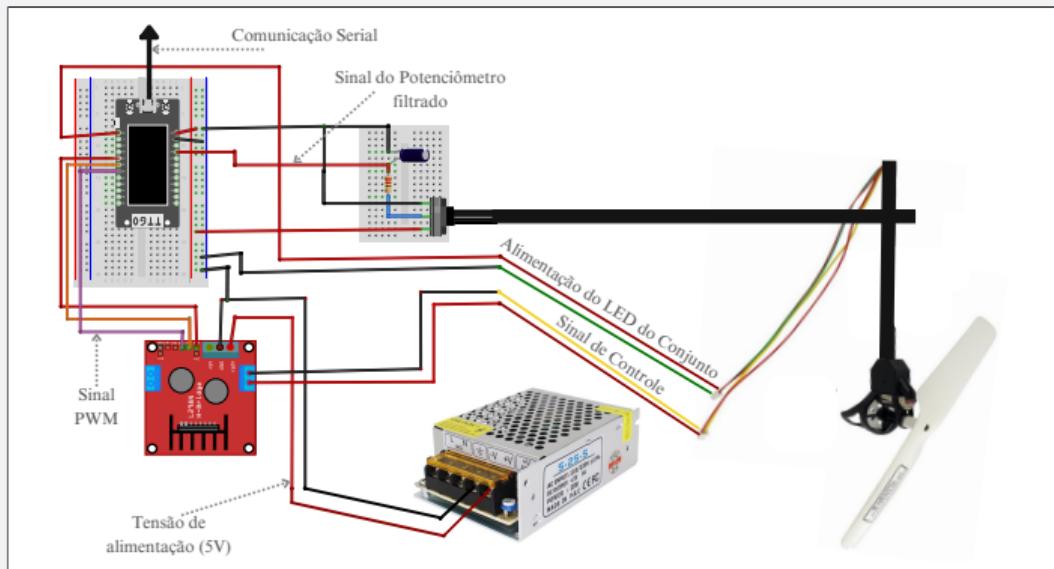
Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Implementação do Protótipo

Montagem do Protótipo - Parte Elétrica

Figure: 17. Esquema de conexões elétricas do Aeropêndulo.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Desenvolvimento dos Softwares

- Gêmeo Digital;
- Interface Gráfica de Usuário);
- Firmware do Microcontrolador.

Linguagens Usadas

Linguagens Python, C e C++

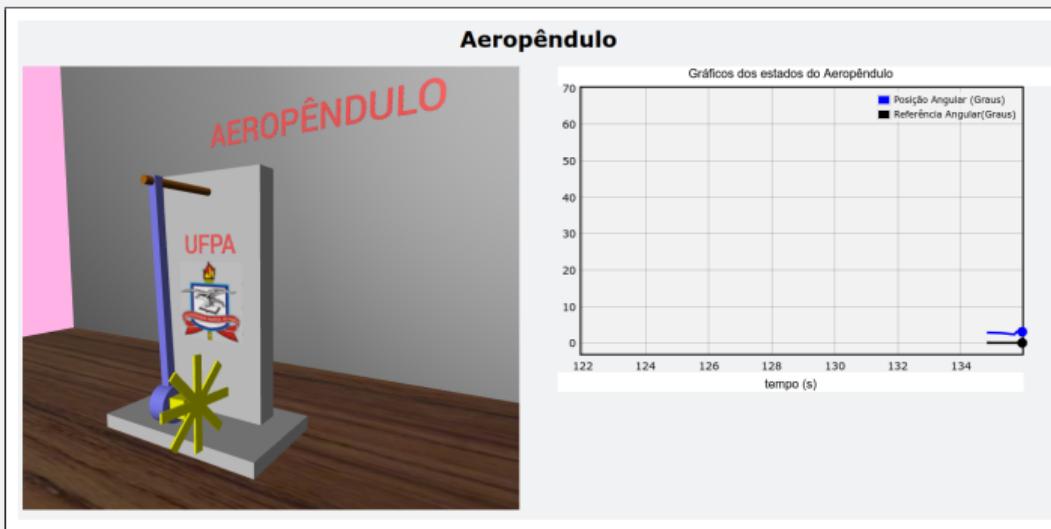


Desenvolvimento dos Softwares

Gêmeo Digital

- Biblioteca Python VPython.

Figure: 18. Gêmeo Digital - Simulador com VPython.

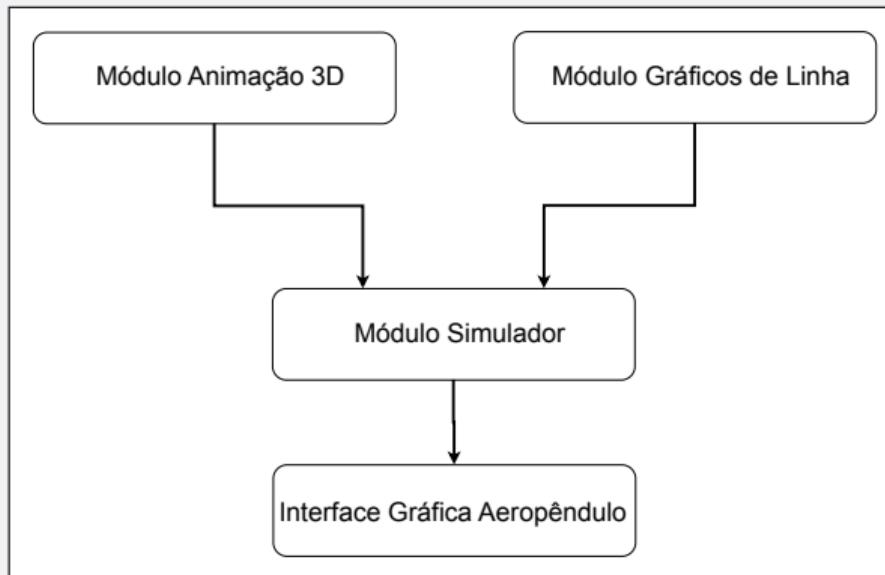


Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Desenvolvimento dos Softwares

Arquitetura do Gêmeo Digital

Figure: 19. Diagrama da arquitetura do Gêmeo Digital.

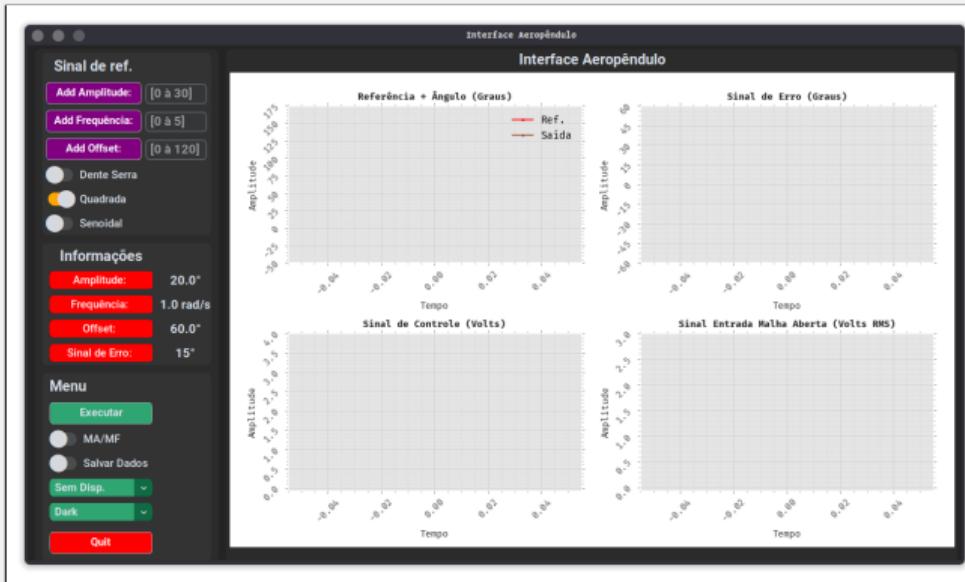


Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Desenvolvimento dos Softwares

Interface Gráfica de Usuário

Figure: 20. Interface Gráfica.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Desenvolvimento dos Softwares

Interface Gráfica de Usuário

Bibliotecas Usadas

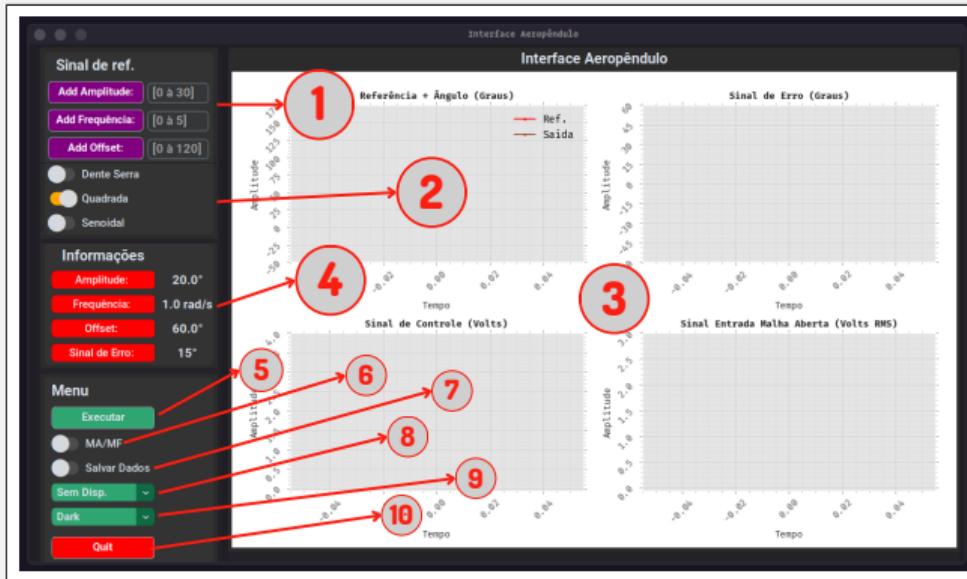
- CustomTkinter;
- Matplotlib;
- PySerial;
- NumPy;
- Pandas.



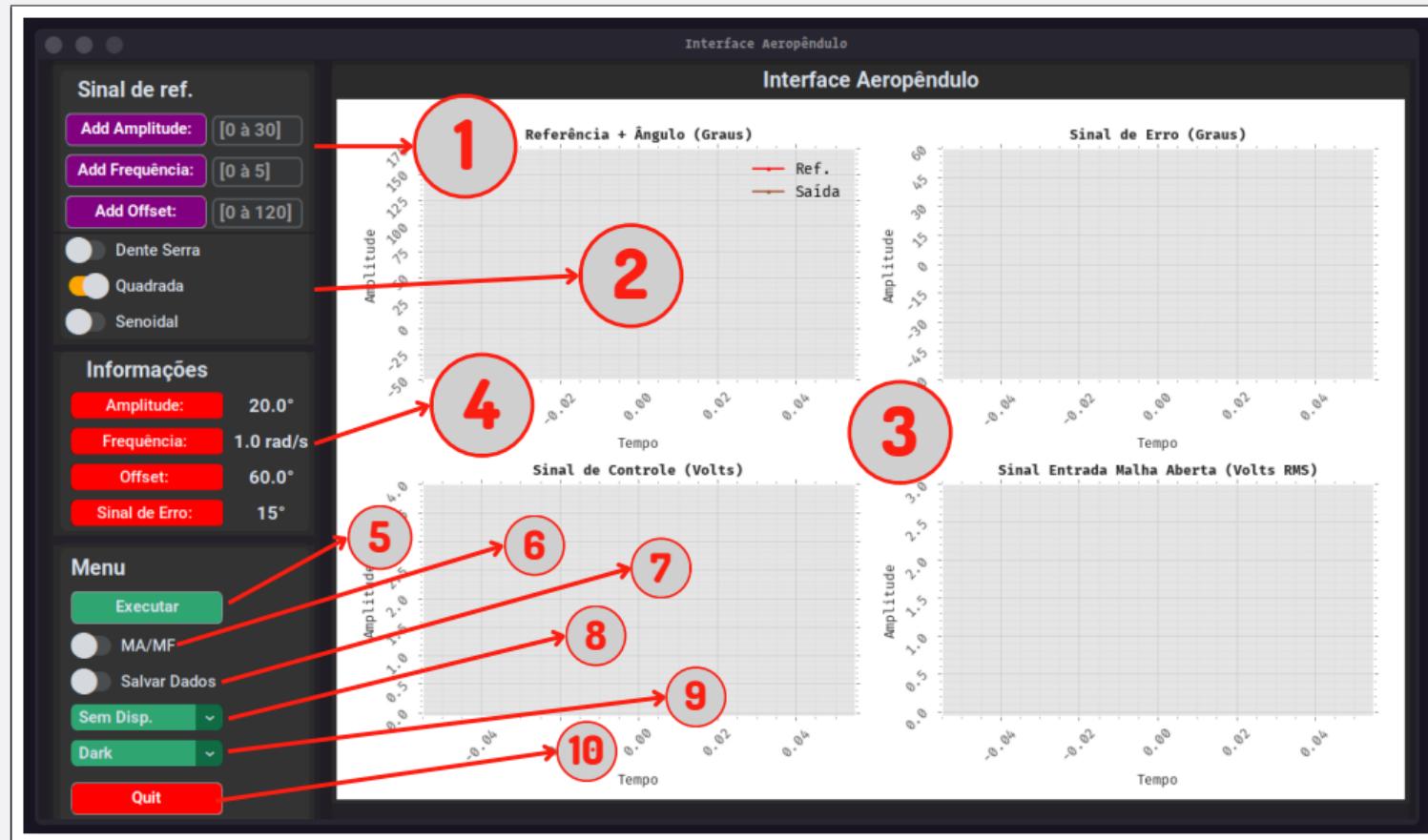
Desenvolvimento dos Softwares

Descrição das partes da interface gráfica

Figure: 21. Partes da Interface Gráfica.



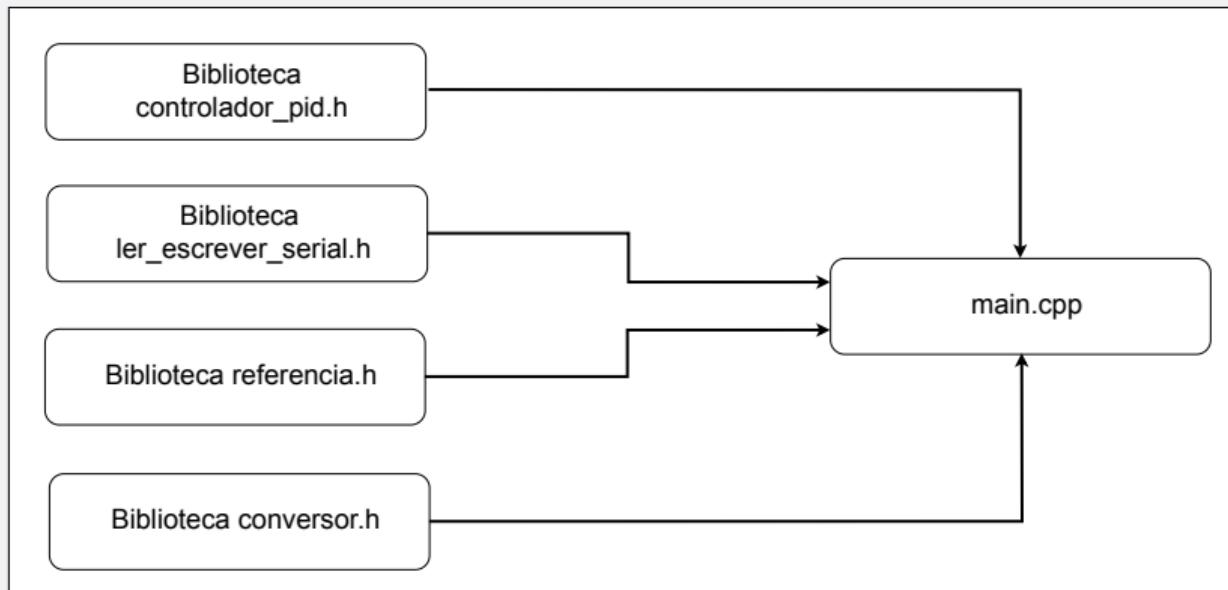
Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Desenvolvimento dos Softwares

Firmware do microcontrolador - ESP32

Figure: 22. Arquitetura do Firmware do Aeropêndulo.

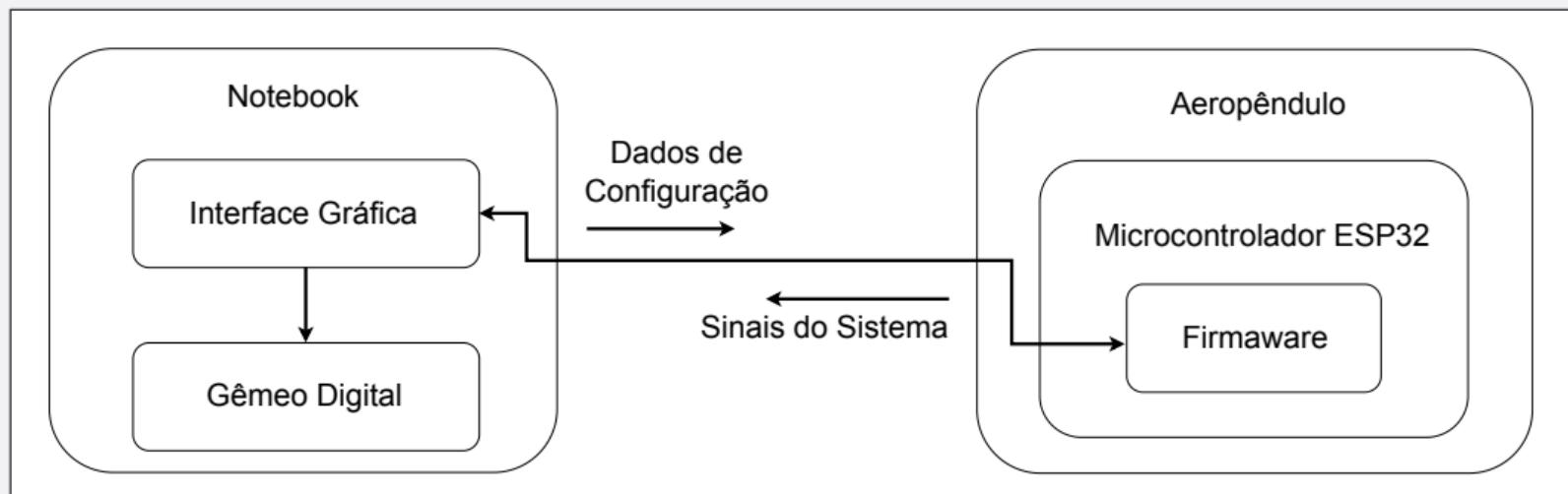


Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Fluxograma do Laboratório Virtual

Figure: 23. Diagrama do Laboratório Virtual.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Índice

- 1 Introdução
- 2 Desenvolvimento
- 3 Resultados e Discussões
- 4 Conclusão



Desenvolvimento do Protótipo e Softwares

Todas as Ferramentas propostas foram desenvolvidas com exito.

Ferramentas desenvolvidas:

- **Protótipo do Aeropêndulo;**
- **Gêmeo Digital;**
- **Interface Gráfica de Usuário;**
- **Firmware.**



Identificação de sistema aplicado ao Aeropêndulo

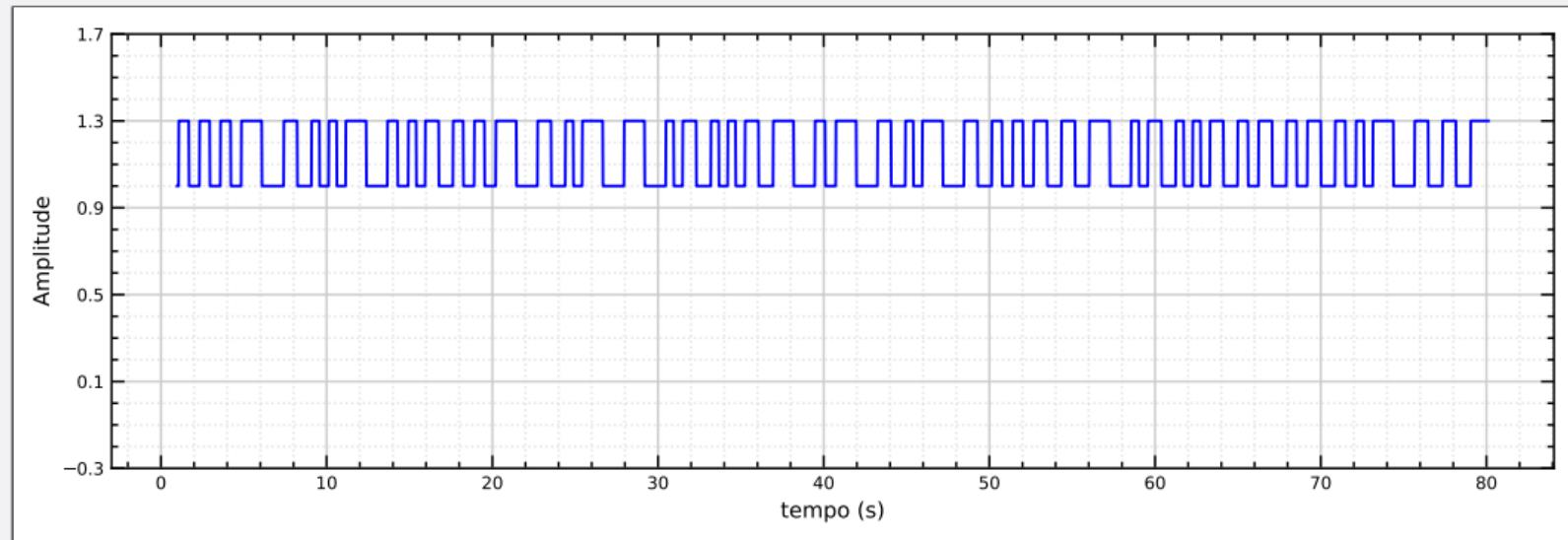
O trabalho (KLARISSA, 2023) foi usando como base teórica para implementar o método.



Identificação de sistema aplicado ao Aeropêndulo

Aplicação do Sinal PRBS na Entrada do Sistema

Figure: 24. Sinal PRBS de entrada.



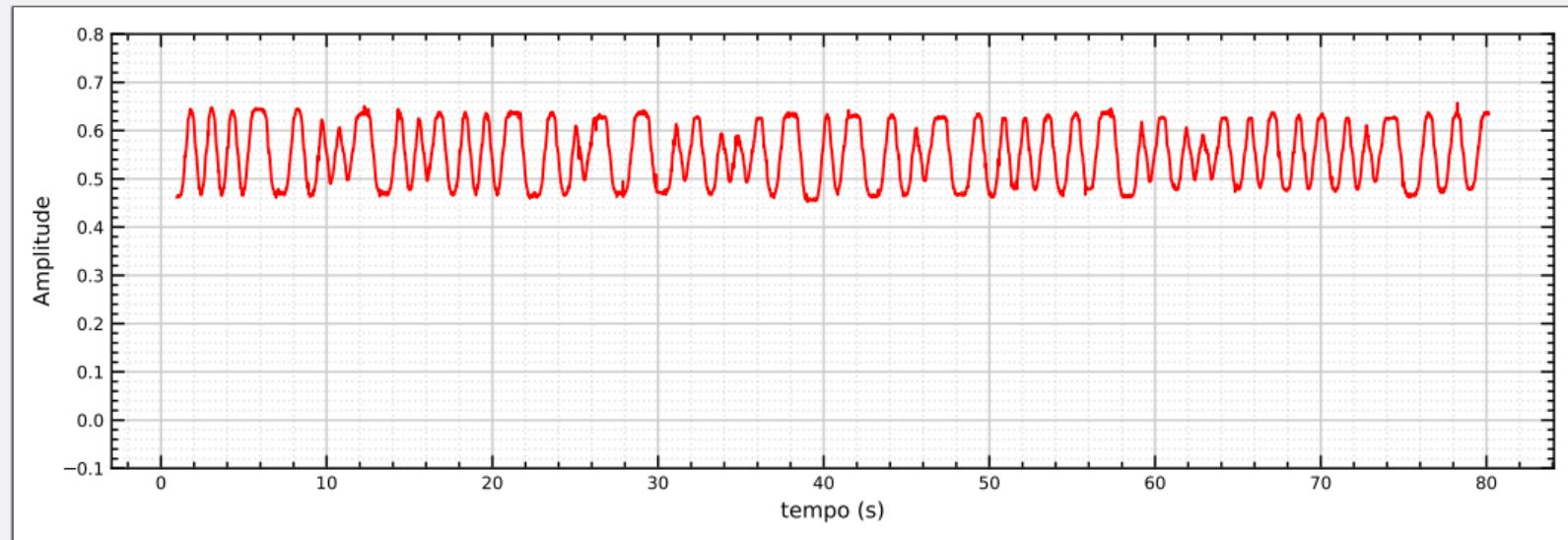
Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Identificação de sistema aplicado ao Aeropêndulo

Sinal de Saída Gerado a Partir do Sinal PRBS de Entrada

Figure: 25. Sinal PRBS de saída.



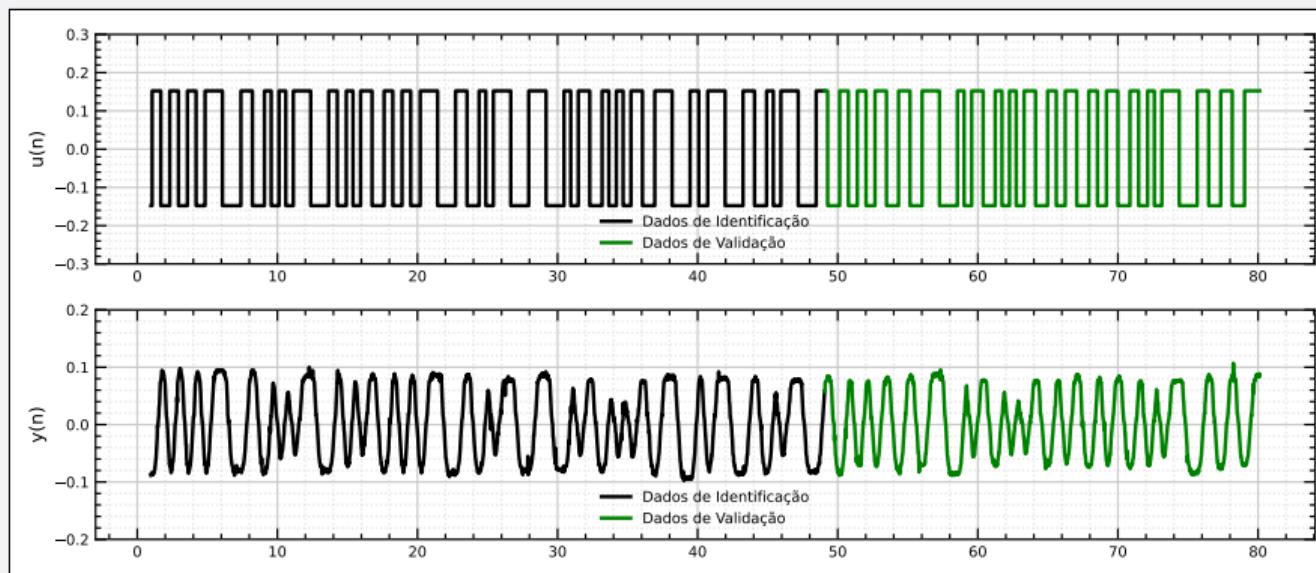
Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Identificação de sistema aplicado ao Aeropêndulo

Dados de Treino e validação

Figure: 26. Dados de identificação e validação do modelo.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Identificação de sistema aplicado ao Aeropêndulo

Modelo de 2º Ordem Identificado

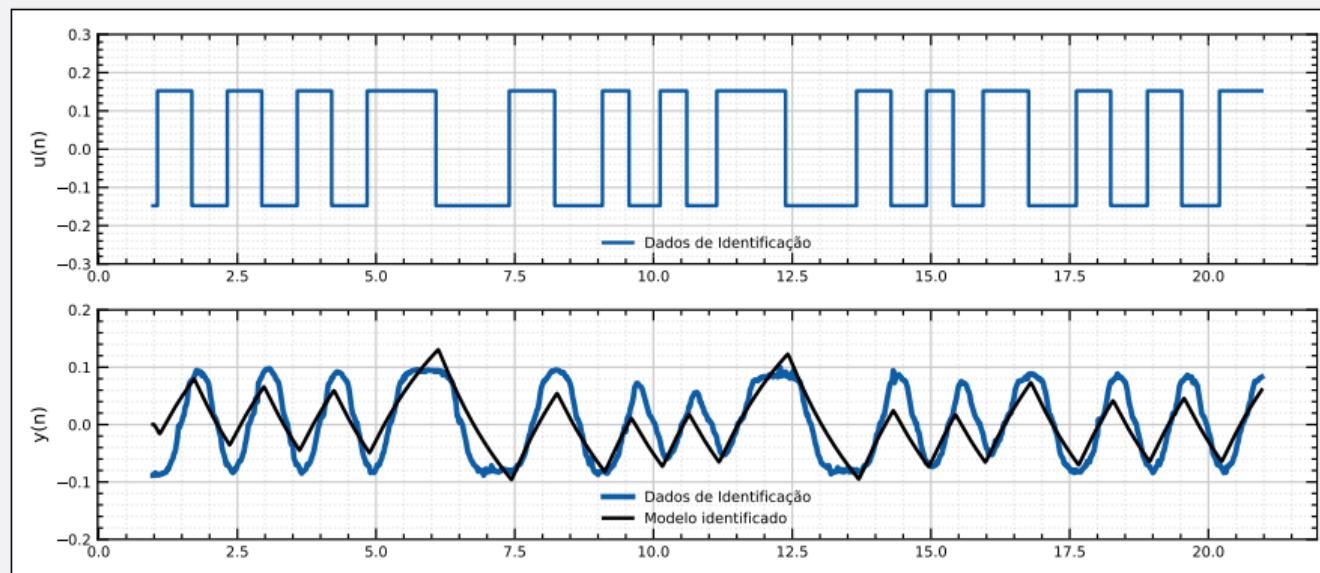
$$Hz = \frac{-0.002602z^2 + 0.004962z + 0.0163}{z^2 - 1.176z + 0.1849} \quad dt = 0.019 \quad (3.3)$$



Identificação de sistema aplicado ao Aeropêndulo

Modelo de 2º Ordem Identificado

Figure: 27. Validação do modelo de segundo grau.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Identificação de sistema aplicado ao Aeropêndulo

Modelo de 2º Ordem Identificado

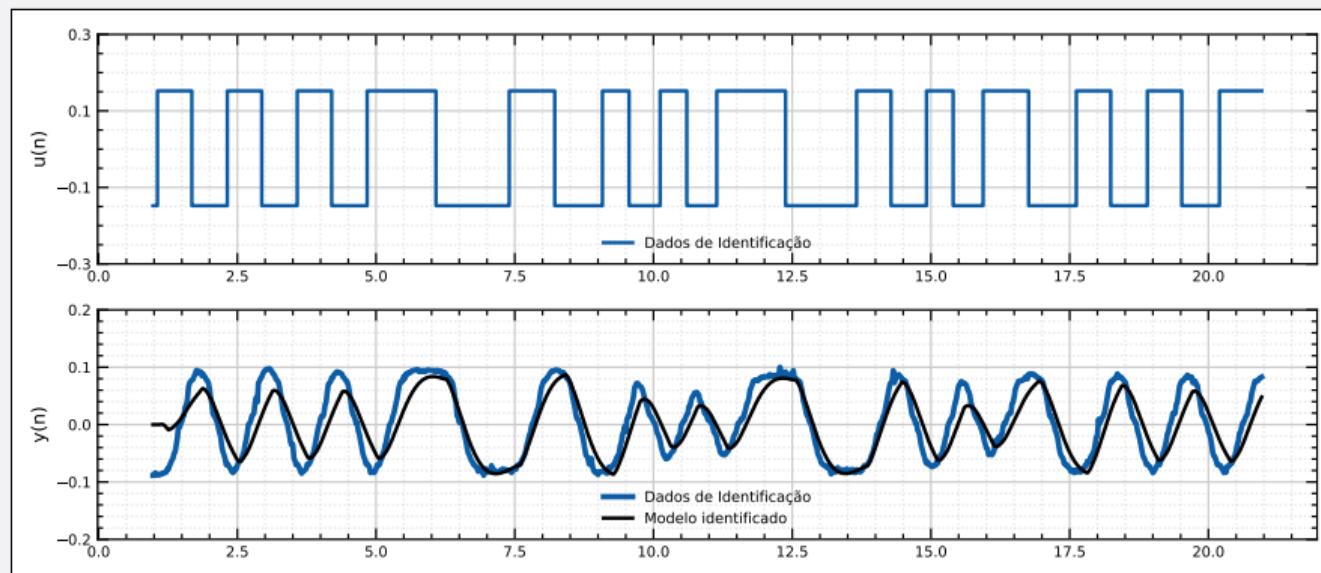
$$Hz = \frac{-0.0029z^3 + 0.0023z^2 + 0.0016z + 0.0097}{z^{10} - 0.9z^9 - 0.3z^8 - 0.014z^7 + 0.13z^6 + 0.15z^5 + 0.012z^4 - 0.05z^3 - 0.12z^2 - 0.02z + 0.15} \quad dt = 0.02 \quad (3.4)$$



Identificação de sistema aplicado ao Aeropêndulo

Modelo de 10º Ordem Identificado

Figure: 28. Validação do modelo de segundo grau.

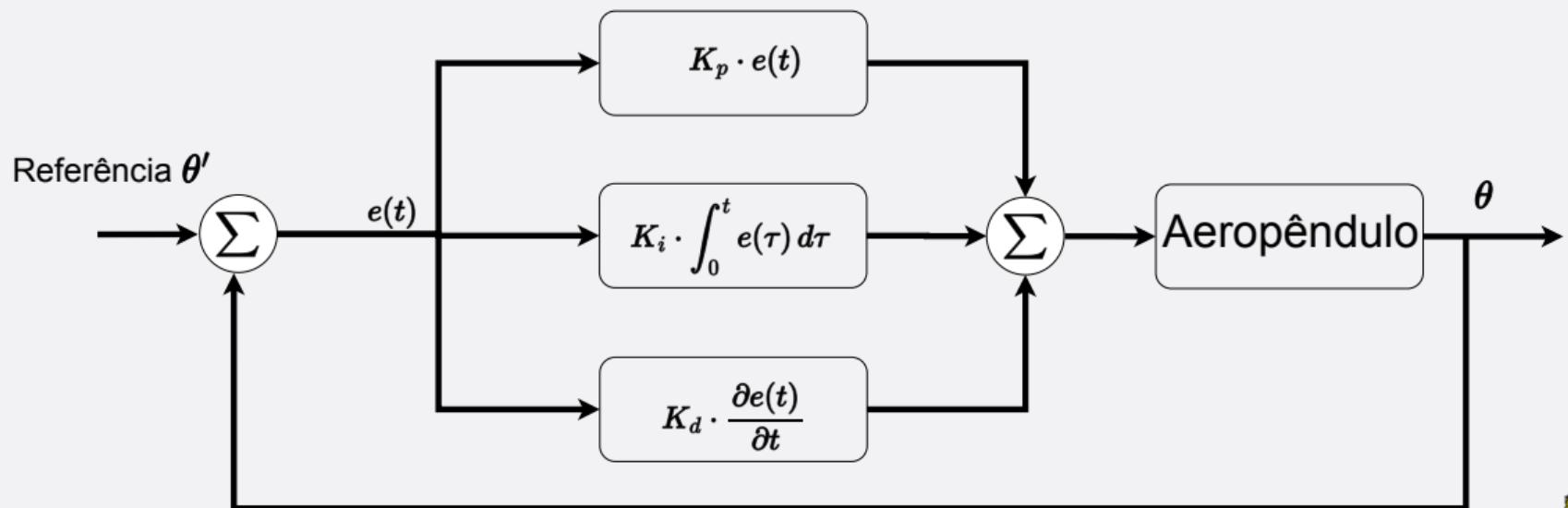


Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Ensaio em Malha Fechada com Controlador PID

Figure: 29. Sistema em Malha Fechada com Controlador PID.

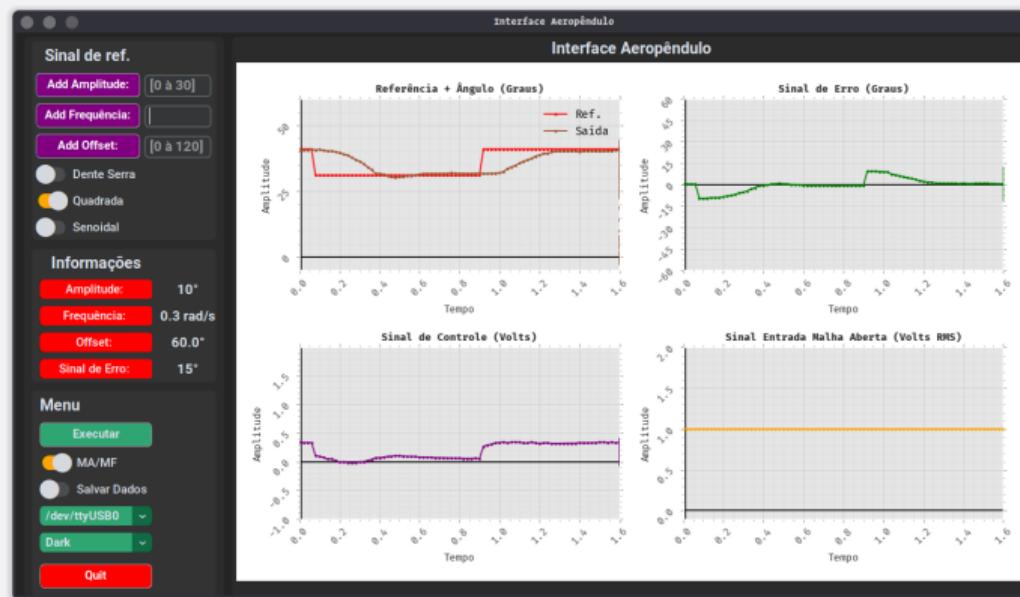


Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Ensaio em Malha Fechada com Controlador PID

Onda Quadrada

Figure: 30. Gráficos dos Estados do Aeropêndulo com Controlador PID.



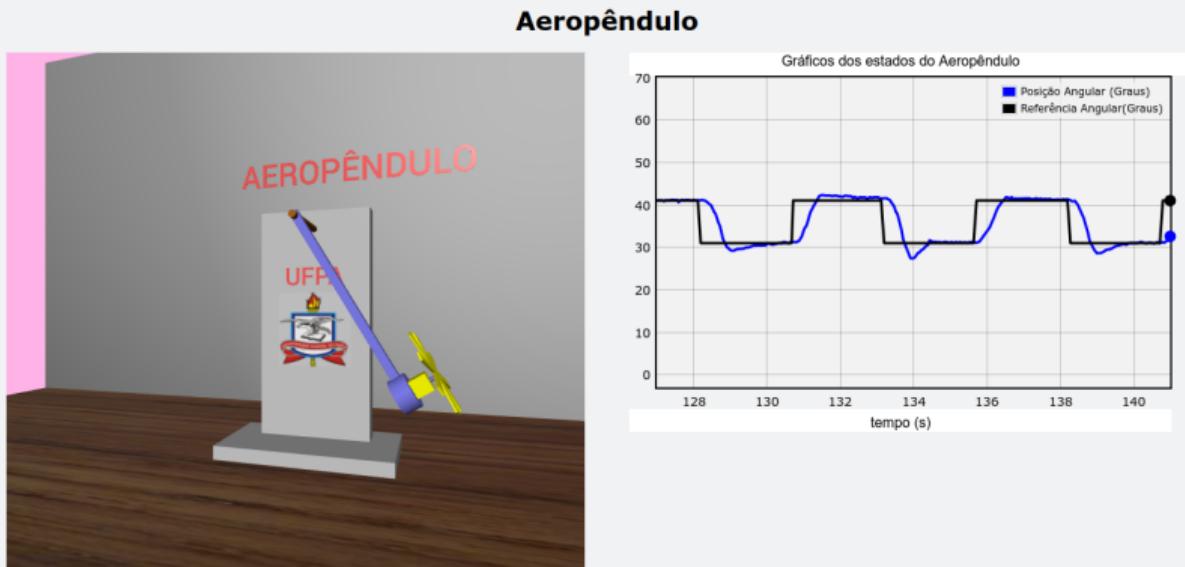
Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Ensaio em Malha Fechada com Controlador PID

Onda Quadrada

Figure: 31. Gêmeo Digital com Controlador PID.

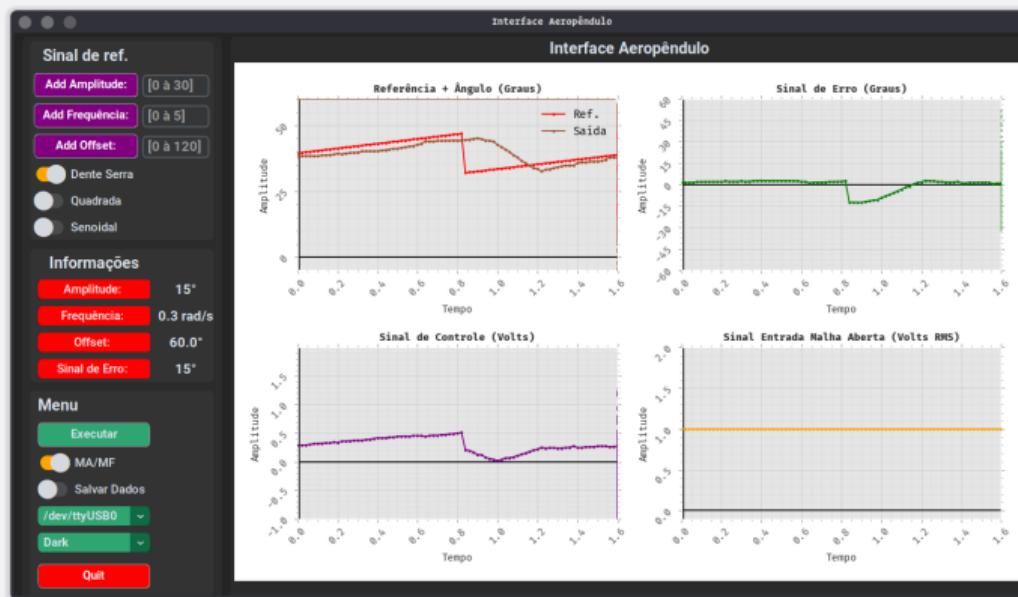


Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Ensaio em Malha Fechada com Controlador PID

Onda Dente de Serra

Figure: 32. Sistema em Malha Fechada com Controlador PID.



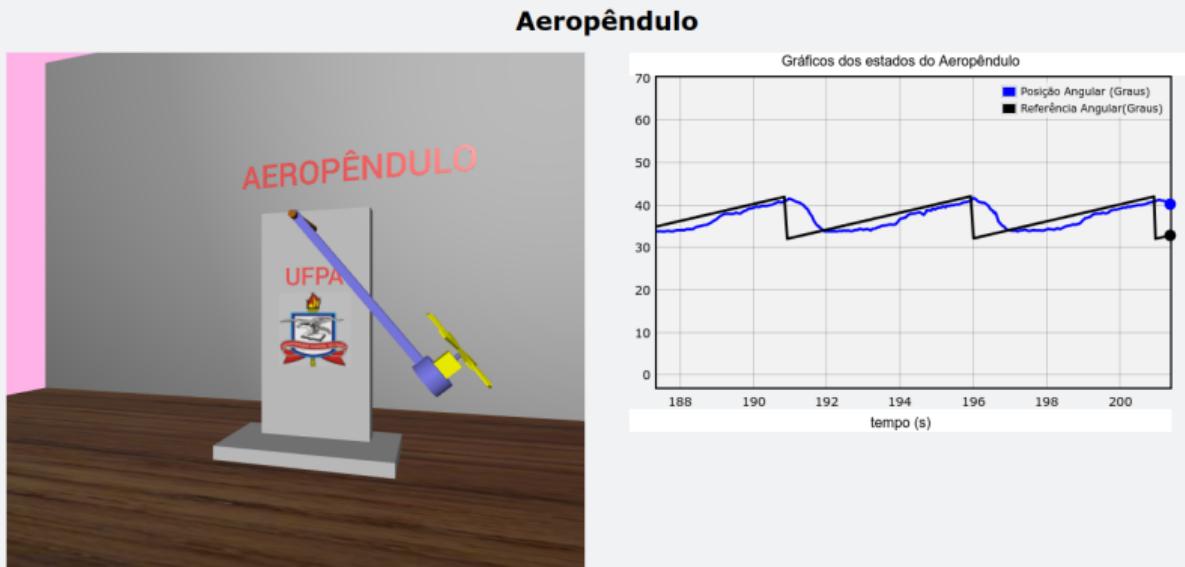
Fonte: elaborado pelo autor (2023).



Ensaio em Malha Fechada com Controlador PID

Onda Dente de Serra

Figure: 33. Sistema em Malha Fechada com Controlador PID.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Índice

- 1 Introdução
- 2 Desenvolvimento
- 3 Resultados e Discussões
- 4 Conclusão



Considerações Finais

- Protótipo implementado e testado;
- Softwares implementados e testados;



Trabalhos Futuros

- Identificação de sistemas, explorando diferentes métodos;
- Desenvolvimento de controladores por meio de abordagens clássica ou com o uso de inteligência artificial;
- O projeto avançará com a elaboração de uma documentação abrangente;

